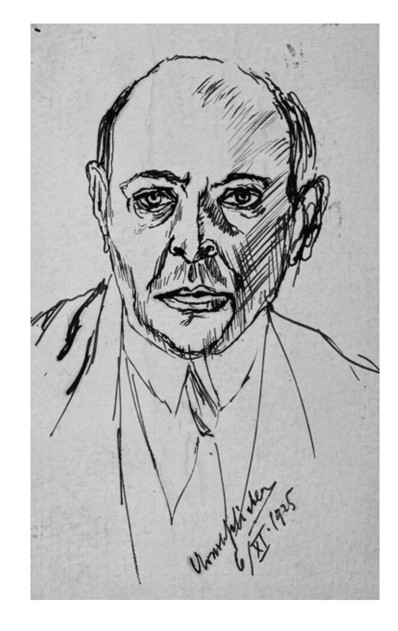
MUSICA, COMPLEJIDAD, INFORMACION

Damián Horacio Zanette – abril de 2008

"Dos impulsos se enfrentan en el hombre: la demanda de repetición de estímulos placenteros, y el deseo opuesto de variedad, de cambio, de nuevos estímulos". Con estas palabras, Arnold Schoenberg introducía los dos principios fundamentales que determinan la forma musical. La repetición de elementos perceptivos –motivos melódicos, pautas rítmicas, progresiones armónicas– da coherencia a la estructura de la música, la que, a su vez, es la base de su inteligibilidad. La variación, por su parte, es necesaria para evitar monotonía y aburrimiento. *"La variedad es la madre del deleite en la Música"*, como lo había expresado tres siglos antes un colega de Schoenberg, el compositor Giovanni Maria Bononcini. En la búsqueda de una combinación satisfactoria de inteligibilidad y contenido estético, la música conlleva un sutil balance de reiteración y cambio, de redundancia y novedad, de formas recurrentes y nuevas componentes.



*Arnold Schoenberg (*Autorretrato, *1925) conceptualizó los roles complementarios de repetición y variación en la composición musical.*

Este delicado equilibrio entre uniformidad y diversidad evoca la naturaleza de la clase de entidades que llamamos *sistemas complejos*. Un grado intermedio de organización interna, que permite que el sistema eluda comportamientos incoherentes pero que, al mismo tiempo, hace posible su riqueza dinámica y flexibilidad funcional, es el signo clave de la complejidad. El movimiento desordenado y azaroso de las moléculas del aire, o el tictac periódico e invariable del reloj, difícilmente puedan identificarse con el producto de un sistema complejo. En cambio, aun la más elemental función de una modesta bacteria revela la complejidad subyacente del organismo vivo.

¿Es posible cuantificar el grado de complejidad de un sistema, midiendo su distancia tanto a la aleatoriedad como al orden? En los años '30, el filólogo G. K. Zipf, quien estudiaba la estadística de las repeticiones de palabras en transcripciones de largos discursos y textos escritos, dio una respuesta empírica preliminar a esta pregunta. Zipf descubrió una robusta regularidad en la frecuencia relativa de la aparición de diferentes palabras –hoy conocida como *ley de Zipf*– ampliamente verificada en diversos autores, estilos y lenguajes: el número de repeticiones de la n-ésima palabra más frecuente es, muy aproximadamente, inversamente proporcional a n. Si, por ejemplo, la décima palabra más usada en un texto aparece 300 veces, la ley de Zipf predice que la centésima aparecerá unas 30 veces. A partir de investigaciones realizadas por M. G. Boroda, B. Manaris, y colaboradores, hoy sabemos que las composiciones musicales presentan una regularidad similar a la ley de Zipf. En este

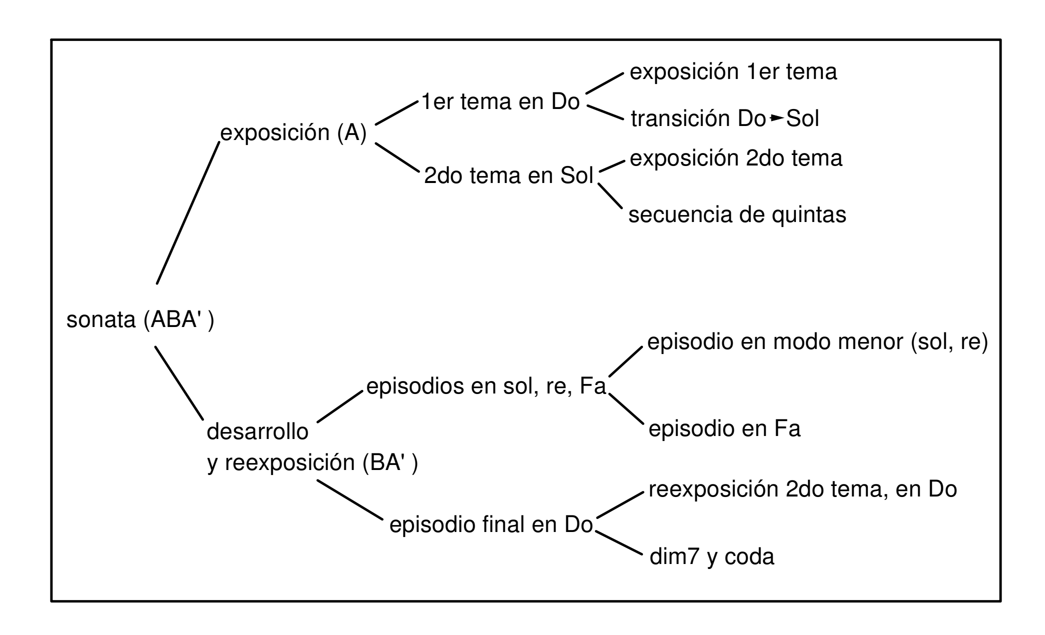
caso, el papel de las palabras en la estadística de repeticiones está desempeñado por notas individuales –cada una definida por su altura y duración– o por elementos compuestos, tales como pares o tríos de notas, sucesiones de intervalos, y acordes.

Dos décadas después del trabajo de G. K. Zipf, el sociólogo H. Simon señaló que la ley de Zipf puede explicarse cuantitativamente suponiendo que, a medida que se genera un texto, la frecuencia de uso de una dada palabra crece proporcionalmente al número de sus apariciones anteriores. Esta simplísima regla dinámica, que describe el refuerzo en el uso de las palabras durante la generación de un texto –un mecanismo que los matemáticos estadísticos llaman *proceso multiplicativo*– fue suficiente para que Simon dedujera la relación inversa entre el número de apariciones de una palabra y su rango. Más recientemente, se ha demostrado que la misma regla explica la frecuencia relativa en el uso de notas individuales en piezas musicales, lo que sugiere una fuerte afinidad entre los procesos de generación de un texto literario y de una composición musical.

El modelo de Simon puede interpretarse conceptualmente como una representación de la secuencia de decisiones del autor a lo largo del proceso creativo –gramáticas, morfológicas, semánticas en el lenguaje; melódicas, armónicas, dinámicas en la música– que dan origen a la inteligibilidad de la obra. Así, captura el mecanismo básico de refuerzo progresivo en el uso de ciertos elementos perceptivos, cuya recurrencia es esencial para inducir respuestas neurofísicas y psicológicas duraderas en el cerebro del oyente, desde la creación y evocación de memorias, hasta la asociación con imágenes, sensaciones y sentimientos. Por supuesto, los textos literarios y las composiciones musicales reales se crean como entidades orgánicas, no como la mera sucesión de decisiones aisladas. El resultado, de todos modos, es una secuencia ordenada de eventos que transmiten información, es decir, un mensaje con significado. A medida que el mensaje fluye, emerge espontáneamente un marco cognitivo –el *contexto*– que sustenta su coherencia, favoreciendo la aparición subsiguiente de algunos elementos, a costa de otros. Desde este punto de vista, el modelo de Simon para la ley de Zipf provee una unificación del concepto de contexto en lenguaje y en música. Al mismo tiempo, las variaciones en la forma de la ley de Zipf para composiciones musicales de diferentes autores hacen posible discernir entre sus diversas elecciones. La indefinición intencional del contexto tonal en las obras de Schoenberg, por ejemplo, puede compararse cuantitativamente con el uso más consistente, pero menos flexible, de elementos tonales por parte de Bach o Mozart. De todas maneras, es sugestivo recordar que la técnica dodecafónica inventada por Schoenberg para componer música atonal también está basada en los principios de repetición y variación, en este caso, de secuencias prescriptas formadas por los doce tonos de la escala.

La caracterización estadística de la estructura musical no se agota con la ley de Zipf, sin embargo. Supóngase que todas las notas de una composición se reordenan aleatoriamente, preservando el número de apariciones de cada nota. La ley de Zipf todavía se cumpliría, ¡pero el mensaje musical se habría perdido completamente! Este “experimento pensado” llama la atención sobre el hecho de que, además de la frecuencia de repetición de las notas, su organización en la pieza musical es esencial para que ésta sea inteligible. Su progresión específica y la variación de su frecuencia relativa a lo largo de la composición define, a escalas de duración creciente, desde intervalos característicos, patrones melódicos, frases, pasajes modulatorios, y dominios tonales, hasta secciones enteras.

La teoría de la información nos brinda una variedad de herramientas para el análisis estadístico de una secuencia de símbolos. Entre ellos, la *segmentación* tiene por objeto detectar porciones de la secuencia que difieren tanto como sea posible en su contenido relativo de los diferentes símbolos. Este método procede por etapas, dividiendo primero la secuencia entera en dos segmentos con máxima diferencia en la frecuencia con que los varios símbolos aparecen en ellos, y luego iterando el algoritmo en los segmentos resultantes. El producto es una disección de la secuencia en dominios que difieren máximamente en cuanto a su composición. El método de segmentación fue usado recientemente para analizar la estructura de una pieza musical, el primer movimiento de la sonata para piano en do mayor (K. 545) de Mozart, como una secuencia formada por las doce notas de la escala cromática. Notablemente, todos los pasos de segmentación detectaron variaciones significativas en el contexto tonal de la obra. El primer paso separó la primera sección de la sonata –la exposición– del resto, en el punto preciso en que la tonalidad cambia abruptamente de sol mayor a sol menor. El segundo paso separó el primer tema, en do mayor, del segundo, en sol mayor, en la mitad de la primera sección, y detectó el comienzo del episodio final, en que se reexpone el segundo tema en la tonalidad de do mayor. Los pasos sucesivos definieron nuevo puntos de segmentación asociados con la utilización de recursos tonales crecientemente elaborados, tales como el episodio modulatorio del primer tema al segundo, una extensa secuencia de quintas y, hacia el final de la pieza, el uso de un acorde de séptima disminuida. En resumen, la segmentación reveló esencialmente los mismos dominios tonales que un humano entrenado en análisis musical habría señalado. Tal como C. Krumhansl demostró experimentalmente en la sonata K. 282 de Mozart, la segmentación de composiciones musicales hecha por oyentes no especialistas también ocurre en los “picos de tensión” determinados, entre otros factores, por cambios de tonalidad.



Resultado de los tres primeros pasos de segmentación del primer movimiento de la sonata K. 545 de Mozart, partiendo de la estructura ternaria tradicional (forma sonata, ABA’) de la pieza.

El algoritmo de segmentación no se restringe necesariamente al análisis de la distribución relativa de las doce notas de la escala musical. El mensaje musical puede interpretarse como una secuencia formada por otras colecciones de símbolos, por ejemplo, combinaciones de altura y duración, notas provistas de atributos dinámicos, intervalos y acordes. Usando estos elementos más complejos, la segmentación podría poner en evidencia patrones relacionados con cualidades cognitivas más ricas, tales como aquellas que el oyente asocia con carácter y sentimientos. Sin embargo, a medida que la colección de símbolos crece en tamaño y sofisticación, sus frecuencias individuales en el mensaje musical decrecen. Eventualmente, el algoritmo encontrará una limitación que afecta a todos los métodos estadísticos –el muestreo finito. Cuando el número de apariciones de cada símbolo deja de ser estadísticamente significativo, no es posible distinguir un mensaje con información de una secuencia aleatoria.

En el contexto del análisis de secuencias de ADN, donde la segmentación se ha usado para detectar patrones de correlación de largo alcance, se sugirió que una distribución ancha de longitudes de segmentos –con un número sustancial de segmentos largos, medios y cortos– podría considerarse una *medida de complejidad* cuantificable. De hecho, tanto las secuencias aleatorias como las periódicas dan lugar a segmentos cuyas longitudes son mutuamente muy parecidas. En cambio, las secuencias de ADN, con su carga de información genética, están caracterizadas por una distribución de longitudes con una larga cola, lentamente decreciente. El ensayo de esta sugerencia en otras secuencias de símbolos, tales como las de origen literario o musical, es actualmente una cuestión completamente abierta. Es difícil sobreestimar el interés que despertaría tener una herramienta para cuantificar eficientemente la complejidad de un sistema. Tal herramienta –que debería ubicarse en la categoría de cuantificadores universales en la que, por el momento, sólo se encuentra la entropía– podría utilizarse para dirimir objetivamente las hasta ahora estériles controversias sobre la complejidad relativa de los lenguajes humanos o de los estilos musicales.

Además de contribuir a dilucidar la estructura organizacional de la música, y su relación con los procesos cognitivos que induce, los métodos estadísticos de análisis musical podrían encontrar aplicaciones más terrenas en tareas relacionadas con la clasificación de composiciones musicales, tales como atribución de autoría, y reconocimiento de estilo y época. La clasificación automática de textos literarios –una rama bien desarrollada de las ciencias de la computación– está basada en el uso simultáneo de varios algoritmos, que analizan desde las construcciones gramaticales y sintácticas hasta correlaciones de largo alcance y frecuencias relativas en el uso de las palabras. El crecimiento explosivo de colecciones de textos digitalizados requiere algoritmos de clasificación de alta eficiencia, capaces de evitar errores de asignación que serían equivalentes a ubicar incorrectamente un libro en una enorme biblioteca. Por el contrario, el problema de la clasificación automática de la música está, como mucho, en una etapa incipiente. Paradójicamente, mientras que –debido a su falta de semántica funcional– la estructura de los mensajes musicales es mucho más flexible y diversificada que la de un texto literario, la identificación de los rasgos claves que definen tal diversidad es mucho más evasiva. Por ejemplo, sería difícil que una persona mínimamente familiarizada con la música clásica confundiera un concierto de Vivaldi con uno de Haydn. Pero ¿cuáles son las características precisas que los hacen tan obviamente diferentes?



Andrea Luchesi (1741-1801). ¿Autor de varias de las sinfonías atribuidas a Mozart?

Los algoritmos de clasificación musical basados en métodos estadísticos podrían no sólo contribuir a la organización automática de bases de datos digitales, sino también proponer soluciones a problemas de atribución de autoría de larga data, dando al mismo tiempo intervalos de confianza para sus respuestas: La partitura de *L'Incoronazione di Poppea* que conocemos hoy ¿es el producto de la inspiración de Monteverdi, o el resultado de la colaboración de varios editores, durante las primeras representaciones por toda Italia? El coral *Nun ist das Heil und die Kraft* (BWV 50), cuyo manuscrito autógrafo nunca se encontró, ¿fue realmente compuesto por Bach? ¿Fue Andrea Luchesi el verdadero autor de las sinfonías que, por la confabulación de un príncipe alemán, se atribuyeron luego a Mozart?

La naturaleza objetiva, impersonal, vacía de emociones, del análisis estadístico parece contraponerse con muchas de las vías tradicionales de apreciar una obra de arte, que enfatizan sutilezas estéticas, cualidades psicológicas, y valores individuales e íntimos casi inefables. De hecho, la integración y elaboración de la información sensorial en lo que llamamos una experiencia artística, en toda su complejidad, podría quedar para siempre fuera del alcance de una mera descripción cuantitativa. Por otro lado, los métodos estadísticos pueden poner en evidencia y esclarecer nuevas facetas de la creación artística, asociadas a la organización –en una estructura inteligible– de sus muchos e interrelacionados elementos, enriqueciendo y complementando de este modo nuestra comprensión, todavía exploratoria, de un fenómeno tan complejo.

Damián H. Zanette (zanette@cab.cnea.gov.ar) es investigador en el Grupo de Física Estadística e Interdisciplinaria del Centro Atómico Bariloche, y profesor asociado de física en el Instituto Balseiro, Bariloche, Argentina.

Bibliografía

Bernaola-Galván, P., Román-Roldán, R. & Oliver, J. L. Compositional segmentation and long-range fractal correlations in DNA sequences, *Physical Review E* **53**, 5181-5189 (1996).

Bononcini, G. M. *Musico Prattico* (Georg Olms Verlag, Hildesheim, 1969). Reproducción de la edición boloñesa de 1673.

Boroda, M. G. & Polikarpov, A. A. The Zipf-Mandelbrot law and units of different text levels. *Musikometrika* **1**, 127-158 (1988).

Krumhansl, C. L. A perceptual analysis of Mozart's piano sonata K. 282: Segmentation, tension, and musical ideas. *Music Perception* **13**, 401-432 (1997).

Manaris, B., Romero, J., Machado, P., Krehbiel, D., Hirzel, T., Pharr, W. & Davis, R. B. Zipf's law, music classification and aesthetics. *Computer Music Journal* **29**, 55-69 (2005).

Nettheim, N. A bibliography of statistical applications in musicology. *Musicology Australia* **20**, 94-106 (1997).

Patel A. D. Language, music, syntax and the brain. *Nature Neurosciences* **6**, 674-681 (2003).

Peng, C.-K., Buldyrev, S. V., Goldberger, A. L., Havlin, S., Sciortino, F., Simons, M. & Stanley, H. E. Long-range correlations in nucleotide sequences. *Nature* **356**, 168-170 (1992).

Schoenberg, A. *Theory of Harmony [Harmonielehre]* (Faber & Faber, London, 1978).

Simon, H. A. On a class of skew distribution functions. *Biometrika* **42**, 425-440 (1955).

Zanette, D. H. Zipf's law and the creation of musical context. *Musicae Scientiae* **10**, 3-18 (2006).

Zanette, D. H. Segmentation and context of literary and musical sequences. *Complex Systems* **17**, 279-293 (2007).

Zipf, G. K. *The Psychobiology of Language* (Houghton Mifflin, Boston, 1935).